第 38 卷第 2 期
2018 年 1 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.2
Jan.,2018

DOI: 10.5846/stxb201610122065
舒斯,肖玫,陈正洪.樱花始花期预报方法.生态学报,2018,38(2):405-411.
Shu S, Xiao M, Chen Z H.A method for forecasting first-flowering dates of cherry blossoms.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):405-411.

樱花始花期预报方法

舒　斯[1],肖　玫[2],陈正洪[1,*]

1 湖北省气象服务中心,武汉　430205

2 武汉大学资源与环境学院,武汉　430072

摘要:根据对 1981—2016 年 36 年武汉大学樱园日本樱花始花期的记录资料及同期气象资料的研究分析表明:(1)樱花始花期提前,但变化趋势不明显,变率特别大,平均始花期为 3 月 14 至 15 日(闰年为 13 至 14 日);(2)为改进始花期预报方程,计算 1 月 1 日及 2 月 1 日至开花前期 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日的活动积温,发现积温与始花期相关性显著,可作为樱花始花期预报方程的因子;(3)分析始花期与 1 月 1 日及 2 月 1 日至开花前期 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日累计日照时数关系,发现始花期与累计日照时数呈负相关;(4)用活动积温作为预报因子改进始花期预报方程预报始花期,有效地提高了预报准确率。

关键词:樱花;始花期;积温;始花期预报

A method for forecasting first-flowering dates of cherry blossoms

SHU Si[1], XIAO Mei[2], CHEN Zhenghong[1,*]

1 *Hubei Provincial Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430205, *China*

2 *College of Resource and Environmental Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*

Abstract: The prediction of flowering date of Japanese cherry blossoms has an economic value on the local tourism industry, which could help the local government and tourists manage and arrange the tourism time. In this study, we investigated the prediction methods of flowering dates of Japanese cherry blossoms, and developed a new prediction method to improve accuracy. First, a 36-year-old (1981—2016) dataset of flowering dates of Japanese cherry blossoms at Wuhan University Campus associated with meteorological data was used for developing a method of forecasting the first-flowering date of cherry blossoms. The first-flowering date of Japanese cherry blossoms was determined by linear regression and the trend of flowering dates over the last 36 years. The annual variation in the first-flowering dates was large, making the trend non-significant. The average of flowering date, in days of the year, was 73.3, which corresponded to March 14—15 (March 13—14 in a leap year). A series of sensitive studies on active accumulated temperature were performed to investigate the method of improving the forecast equation of the first-flowering date. We calculated the active accumulated temperature from January 1 and February 1 to a series of possible flowering dates, such as February 25, February 28 (February 29 in a leap year), March 5, March 10, and March 15, and the results indicated that the correlation between the active accumulated temperature and the first-flowering dates was significantly negative, and thus can be used as a factor in the cherry blossom forecasting equation. The results also showed the forecast accuracy was significantly improved with active accumulated temperature rather than accumulated sunshine hours as a predictor in the prediction equation. Compared to the prediction using the average temperature, the active accumulated temperature method is more advantageous for prediction accuracy,

基金项目:中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程 2017 年建设项目

收稿日期:2016-10-12;　　**网络出版日期**:2017-09-14

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: chenzh64@126.com

and the better result is achieved when the prediction is made close to the real flowering date. We also discuss the prediction method that involved the accumulated sunshine hours, because the first-flowering dates were negatively correlated with the accumulated sunshine hours. This method, however, was not effective in improving the prediction accuracy and requires further investigation.

Key Words: cherry blossoms; first-flowering dates; accumulative temperature; first-flowering dates prediction

随着人民生活水平的不断提高,在满足基础需求以后,以精神需求为主导的旅游需求,越来越旺盛。其中,赏花游受到人们追捧。准确的预测观赏植物的开花期可为公众的出游安排提供指导。根据物候学理论,前期气候条件如光、温、水等对植物开花早晚有重要影响[1],其中气温是影响中国木本植物物候的主要因子[2-6],开花前期气温积累对开花期亦有重要影响[7],而且,根据生物学原理,前期积温条件随着时间推近,对花期影响越大。另外始花期受多种因子的影响,如开花前期累计日照情况等。

武汉大学樱花闻名中外,每到樱花盛开时节,花雨纷飞,游人如织。可每年花期早晚不一,时长时短。武汉大学生物学院肖翊华教授等人自 1947 年起至今进行了连续 70 年樱花花期的观测,从未中断,是一份难得的长序列物候气候变化材料。并且,肖教授发现进入 1980 年代樱花开花期有提前的倾向,并根据十分有限的气象资料和信息,推测此与全球气候变暖尤其是持续暖冬有关。这与陕西杨凌最近 10 年日本樱花花期比 1980 年代提早 10 天[8]以及在日本樱花开花期明显提前[9]的结论一致。另外,观测表明[10],全球平均气温在 1880—2012 年期间升高了 0.85℃,空间分布上以北半球中高纬度大陆升温最明显[11],同样近几十年中国地区也经历着以气候变暖为主要特征的气候变化[12-17]。气候变化的原因一般包括自然强迫、气候系统的内部变率和人类活动(温室气体和气溶胶排放、植被覆盖和土地利用变化等)等。基于类似大量模拟研究,IPCC(政府间气候变化委员会)AR5(第 5 次评估报告)指出[17],极有可能(95%以上信度)的是 1951—2010 年观测到的全球平均表面温度上升中,一半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为强迫共同导致的。

始花期预报在旅游业有很大的实用价值。根据樱花始花期预报方法研究[18-20],开展花期预报,可以指导人们合理安排时间观赏樱花以及校方樱花旅游的管理工作。气温与物候现象的相关性是利用物候学方法重建历史温度变化的基础。对北半球中高纬度地区的研究表明[21],在影响植物物候期的诸多环境要素中(气温、光照、降水、养分等),气温所起作用最大[22]。一般来讲,在一定范围内,气温的升高可促进酶的活性[23],使春季物候期提前[24],秋季物候期推迟[25],植物的生长期延长[26]。2008 年陈正洪等[27]用武汉大学樱园日本樱花 62 年连续的花期资料研究了樱花始花期、落花期、持续天数气候变化特征,建立了始花期预报模型,发现始花期与冬季及 2 月平均气温密切相关,其中基于 2 月平均气温的非线性模型对异常早花有较好的模拟效果。植物的发育进度主要不由物候现象发生时的温度决定,而是与过去一段时间内温度的累加值成比例,这一累加值被称为植物完成发育期所需要的积温[28]。同时,一些植物需要一定的低温条件打破休眠才能促进芽(叶芽和花芽)的发育[29]。仅选取 2 月份平均气温预报始花期,需要等到 2 月底才能进行预报,而且每年只能预报一次,不能全面的考虑樱花始花期前期气温的影响。另外,在陈正洪[27]研究基础上,新累计了 2009 至 2016 年的花期资料,而且近几年始花期提前没有以前明显,是否与近几年雾霾影响有关呢?因此,十分有必要改进始花期预报方程,本文将引入活动积温的概念,并加入日照时数,进一步研究樱花始花期的预报方法,希望能有效地提高预报准确率, 更好的为公众出游安排提供指导。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用樱花始花期为武汉大学樱园日本樱花树 1981—2016 年共 36 年观测资料,始花期标准为每株树有 3—5 朵花开放。气象资料为武汉市气象站同期逐日平均气温、日照时数等。

1.2　方法

将始花期转换为日序数(1 月 1 日记为 1,1 月 2 日记为 2,……),从而得到 36 年完整始花期日序数,其中前 30 年资料用于建立预报模式,后 6 年资料用于预测效果的独立样本检验。本文首先计算日序数与前期积温、累计日照时数的相关系数,选取预报因子,然后通过线性回归的方法建立始花期预报方程。

2　樱花始花期预报因子选取

2.1　始花期基本特征

36 a 平均结果表明,武汉地区日本樱花平均始花期的日序数是 73.3,对应日期平年是 3 月 14 至 15 日,闰年为 3 月 13 至 14 日。最早为 2 月 26 日(2004 年),此外 3 月 5 日前出现的还有 3 月 2 日(2007 年)、3 月 3 日(2016 年)。最晚为 3 月 28 日(1985 年),此外 3 月 25 日及以后出现的还有 3 月 25 日(1984 年)、3 月 27 日(2005 年)、3 月 26 日(2012 年)。

图 1 为 1981 年至 2016 年期间始花期日序数逐年变化与线性拟合结果,可以发现,1981 年至 2016 年始花期日序数有两个特点:一是呈缓慢减少趋势,但变化趋势不明显;二是变率比较大,特别是 2000 年以后。均方差大小可以表示始花期的稳定性程度,计算可以发现均方差较大,最早与最晚可相差 30d。

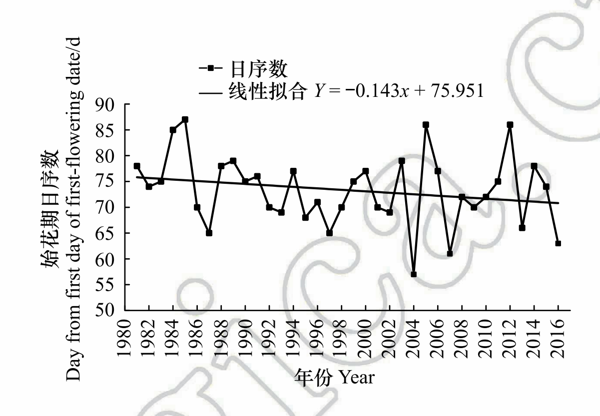


图 1　樱花始花期日序数逐年变化与线性拟合图(1981—2016)

Fig.1　The yearly change of days from the first day every year of first-flowering date for Japanese Cherry Blossoms and its linear fitting (1981—2016)

图 2 为 1981 年至 2016 年期间始花期日序数与 2 月份平均气温逐年变化,可以发现,2 月份平均气温后期(2000 年以后)增长不明显,且变率较大,这与始花期日序数后期变化相对应。

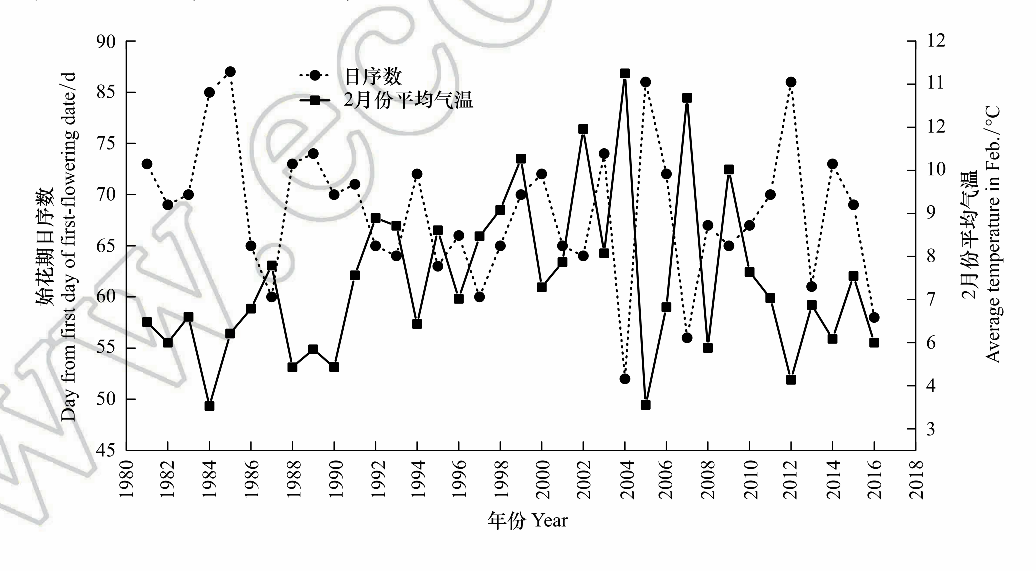


图 2　樱花始花期日序数与 2 月份平均气温逐年变化(1981—2016)

Fig.2　The yearly change of days from the first day every year of first-flowering date for Japanese Cherry Blossoms and average temperature in Feb (1981—2016)

2.2　始花期与前期积温的关系

为了改进始花期预报方程,引入活动积温的概念,始花期一般在 3 月中旬,早的出现在 2 月下旬,晚的出现在 3 月下旬,因此分别分析计算 1 月 1 日与 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日 ≥0℃ 活动积温与始花期的相关性(表 1),可以发现,樱花始花期与前期积温显著负相关,与 2 月 1 日至 3 月

15 日积温表现最为明显,相关系数达到-0.816(图 3),其次是 2 月 1 日至 3 月 5 日积温(图 3),相关系数为-0.798。

表 1 樱花始花期与前期积温相关关系(1981—2010 年)

Table 1 The correlation coefficient between first-flowering dates for Japanese Cherry Blossoms in Wuhan University and accumulated temperature in the previous period (1981—2010)

积温 Accumulated temperature	相关系数 Correlation coefficient	积温 Accumulated temperature	相关系数 Correlation coefficient
1 月 1 日至 2 月 25 日(X_1)	-0.628**	2 月 1 日至 3 月 5 日(X_6)	-0.798**
2 月 1 日至 2 月 25 日(X_2)	-0.728**	1 月 1 日至 3 月 10 日(X_7)	-0.716**
1 月 1 日至 2 月底(X_3)	-0.671**	2 月 1 日至 3 月 10 日(X_8)	-0.786**
2 月 1 日至 2 月底(X_4)	-0.770**	1 月 1 日至 3 月 15 日(X_9)	-0.753**
1 月 1 日至 3 月 5 日(X_5)	-0.709**	2 月 1 日至 3 月 15 日(X_{10})	-0.816**

**表示通过 0.01 的显著性检验

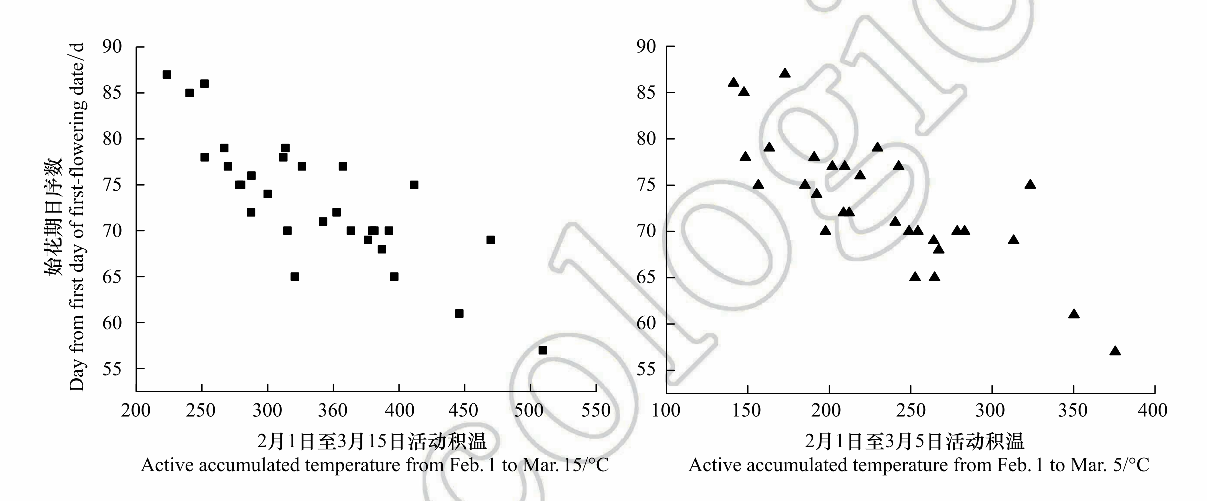


图 3 樱花始花期日序数与 2 月 1 日至 3 月 15 日、2 月 1 日至 3 月 5 日活动积温点聚图(1981—2010)

Fig.3 Scatter plots between the first day every year of first-flowering date for Japanese Cherry Blossoms and active accumulated temperature from Feb. 1 to Mar. 15 and from Feb. 1 to Mar. 5 (1981—2010)

2.3 始花期与前期日照时数的关系

分别分析 1 月 1 日及 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日累计日照时数与始花期的相关性(表 2)。可以发现樱花始花期与累计日照时数呈负相关,与 2 月 1 日至 2 月 25 累计日照时数表现最明显,相关系数为-0.579,其次是 2 月 1 日至 2 月底累计日照时数。

表 2 樱花始花期与前期累计日照时数相关关系(1981—2010 年)

Table 2 The correlation coefficient between first-flowering dates for Japanese Cherry Blossoms in Wuhan University and sunshine duration in the previous period (1981—2010)

日照时数 Sunshine duration	相关系数 Correlation coefficient	日照时数 Sunshine duration	相关系数 Correlation coefficient
1 月 1 日至 2 月 25 日(X_{11})	-0.477**	2 月 1 日至 3 月 5 日(X_{16})	-0.514**
2 月 1 日至 2 月 25 日(X_{12})	-0.579**	1 月 1 日至 3 月 10 日(X_{17})	-0.484**
1 月 1 日至 2 月底(X_{13})	-0.482**	2 月 1 日至 3 月 10 日(X_{18})	-0.540**
2 月 1 日至 2 月底(X_{14})	-0.557**	1 月 1 日至 3 月 15 日(X_{19})	-0.476**
1 月 1 日至 3 月 5 日(X_{15})	-0.460*	2 月 1 日至 3 月 15 日(X_{20})	-0.518**

*表示通过 0.05 的显著性检验,**表示通过 0.01 的显著性检验

3　樱花始花期预报

3.1　积温预报樱花始花期

樱花始花期一般在 3 月中旬,早的出现在 2 月下旬,晚的出现在 3 月下旬。始花期与前期活动积温呈显著负相关,积温值越高,花期越早,反之越迟。通过回归分析,用 1981—2010 年 30 年 1 月 1 日与 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日活动积温分别建立樱花始花期 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、10 日、15 日共 5 个预报方程:

$$Y=0.016X_1-0.122X_2+88.593 \quad (R^2=0.536, sig<0.001) \quad (1)$$

$$Y=0.019X_3-0.119X_4+89.711 \quad (R^2=0.601, sig<0.001) \quad (2)$$

$$Y=0.013X_5-0.106X_6+93.295 \quad (R^2=0.641, sig<0.001) \quad (3)$$

$$Y=0.004X_7-0.088X_8+96.200 \quad (R^2=0.619, sig<0.001) \quad (4)$$

$$Y=0.002X_9-0.081X_{10}+99.782 \quad (R^2=0.666, sig<0.001) \quad (5)$$

用后 6 年 2011—2016 年积温预报樱花始花期,并与实际观测结果对比(表 3),随着花期的临近,误差越来越小,最小平均误差 3 d 左右,而且使用 3 月 10 日与 15 日预报方程,去掉后 6 年中始花期早于 3 月 10 日的两年,始花期的误差在 1 d 左右(括号内表示去掉后 6 年中始花期早于预报时间年份后的平均绝对误差)。

表 3　樱花始花期预报与检验(2011—2016 年)

Table 3　Calculating and testing for fist-flowering dates and duration of flowering for Japanese Cherry Blossoms (2011—2016)

年份 Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	平均绝对误差 Mean absolute difference
式(1)预报结果与实测结果之差(2.25)	-2.30	-6.60	9.87	0.81	0.05	10.8	5.07
式(2)预报结果与实测结果之差(2.28/29)	-1.53	-6.53	8.93	0.27	0.45	8.81	4.42
式(3)预报结果与实测结果之差(3.5)	0.20	-5.05	8.91	0.14	0.91	6.30	3.59(3.04)
式(4)预报结果与实测结果之差(3.10)	0.63	-4.19	5.89	-0.58	1.06	6.43	3.1(1.6)
式(5)预报结果与实测结果之差(3.15)	1.02	-3.43	6.58	-0.46	1.01	7.71	3.37(1.48)

3.2　前期气温预报樱花始花期

为了对比改进后的始花期预报方程的效果,重新用 1981 年至 2010 年 30 年资料建立前期 2 月份平均气温预报方程,线性拟合结果表明(图 4),2 月份平均气温每升高 1℃,日序数将减少 2.62 d,即开花提前 2.62 d。而且用 3 次方程拟合比线性拟合效果更好[24]。

具体方程如下:

始花期日序数(Y)与 2 月份平均气温(X_{21})的回归方程

$$Y=-2.6213X_{21}+90.641 \quad (R^2=0.5846, sig<0.001) \quad (6)$$

$$Y=-0.1658X_{21}^3+3.6949X_{21}^2-28.479X_{21}+147.22 \quad (R^2=0.6424, sig<0.001) \quad (7)$$

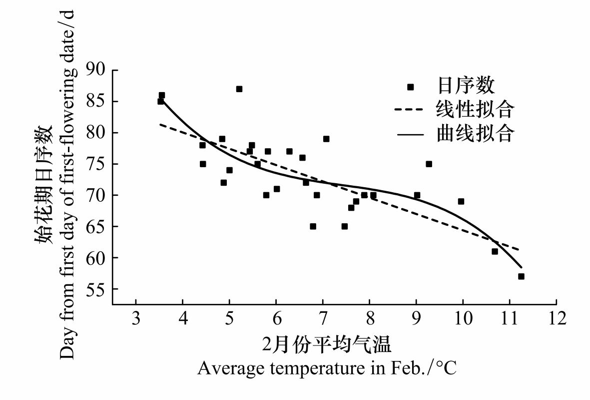


图 4　樱花始花期日序数与 2 月平均气温线性、曲线拟合图(1981—2010 年)

Fig.4　The yearly change of day every year of first-flowering date for Japanese Cherry Blossoms in Wuhan University and its correlation and linear fitting with average temperature in Feb. (1981—2010)

用后 6 年 2010—2016 年预报樱花始花期,并与实际观测结果对比(表 4),可以发现非线性拟合方程预报结果在异常早的 2013、2016 年预报明显比线性方程效果好,这与陈正洪等[27]研究结果一致。对比前面积温预报结果,可以发现,积温预报的误差比 2 月份平均气温预报的误差更小,而且越接近始花期,积温预报效果

越好,这说明积温预报能有效的改进了始花期预报方程。

表 4 樱花始花期预报与检验(2011—2016 年)

Table 4 Calculating and testing for fist-flowering dates and duration of flowering for Japanese Cherry Blossoms (2011—2016)

年份 Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	平均绝对误差 Mean absolute difference
式(6)预报结果与实测结果之差	-0.2	-6.2	9.2	-0.7	-0.5	14.5	5.23
式(7)预报结果与实测结果之差	-1.5	-5.1	7.8	-1.9	-1.4	13.5	5.20

3.3 多因子预报樱花始花期

上述 2.3 中结果表明,2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日活动积温、累计日照时数与始花期呈显著负相关,将其加入预报方程建立新的始花期 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、10 日、15 日共 5 个预报方程(用 1981—2010 年 30 年建立):

$$Y=0.013X_1-0.098X_2-0.067X_{12}+91.446 \quad (R^2=0.611, sig<0.001) \quad (8)$$

$$Y=0.009X_3-0.092X_4-0.051X_{14}+92.710 \quad (R^2=0.655, sig<0.001) \quad (9)$$

$$Y=-0.0002X_5-0.079X_6-0.037X_{16}+96.129 \quad (R^2=0.682, sig<0.001) \quad (10)$$

$$Y=-0.007X_7-0.063X_8-0.039X_{18}+99.274 \quad (R^2=0.668, sig<0.001) \quad (11)$$

$$Y=-0.008X_9-0.061X_{10}-0.026X_{20}+101.700 \quad (R^2=0.687, sig<0.001) \quad (12)$$

用后 6 年 2011—2016 年预报樱花始花期,并与实际观测结果对比(表 5),可以发现,加入累计日照时数对预报结果有进一步改善,但相对积温预报方程改善不是很明显,大概在半天左右。

表 5 樱花始花期预报与检验(2011—2016 年)

Table 5 Calculating and testing for fist-flowering dates and duration of flowering for Japanese Cherry Blossoms (2011—2016)

年份 Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	平均绝对误差 Mean absolute difference
式(8)预报结果与实测结果之差(2.25)	-3.61	-5.25	11.52	1.44	0.63	8.87	5.22
式(9)预报结果与实测结果之差(2.28/29)	-1.58	-5.40	10.95	0.91	1.01	6.28	4.35
式(10)预报结果与实测结果之差(3.5)	0.70	-3.62	10.20	0.65	1.27	4.99	3.57(3.29)
式(11)预报结果与实测结果之差(3.10)	0.79	-2.14	7.33	0.26	1.60	5.25	2.90(1.20)
式(12)预报结果与实测结果之差(3.15)	1.07	-2.30	7.49	-0.52	1.00	6.71	3.18(1.22)

4 结论与讨论

根据 1981—2016 年连续 36 年对武汉大学樱园日本樱花始花期的记录资料及同期气象资料的研究分析表明:

(1)樱花平均始花期为 3 月 14 至 15 日(闰年为 13 至 14 日),这 36 年始花期日序数变化趋势不明显,变率比较大,特别是 2000 年以后。

(2)通过分析始花期与 1 月 1 日及 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日活动积温的关系,发现始花期与积温相关性显著。通过分析始花期与 1 月 1 日及 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日累计日照时数关系,发现始花期与 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日累计日照时数呈显著相关。

(3)通过引入活动积温和累计日照时数改进始花期预报方程,可以发现,用 1 月 1 日与 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月 15 日活动积温建立的预报方程,随着花期的临近,误差越来越小,最小平均误差 3 天左右,而且使用 3 月 10 日与 15 日预报方程,去掉始花期早于 3 月 10 日的两年,始花期的误差在 1 天左右,有效的改进了始花期预报方程。而加入 2 月 1 日至 2 月 25 日、2 月底、3 月 5 日、3 月 10 日、3 月

15 日累计日照时数建立预报方程对预报结果改善不是很明显。

最新研究指出[30]降温和降水作用可能对春季植物物候学有复杂影响,这对改善物候模型有重要意义,因此,还需深入分析始花期前期降温和降水作用的影响。另外,本文使用的资料站点在 2010 年迁过站,经过分析发现气温与日照时数在 2010 年并无突变,所以本文直接使用,但根据最新研究成果,在迁站前后站点的遮挡率有了一定的改变[31],这是否对日照时数的相关结果有影响,需要进一步研究。

参考文献(References):

[1] 竺可桢, 宛敏谓. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973.
[2] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, 1995(5): 402-410.
[3] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对我国刺槐、紫丁香始花期的影响. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 94-97.
[4] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
[5] 柳晶, 郑有飞, 赵国强, 陈怀亮. 郑州植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2007, 27(4): 1471-1479.
[6] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 张金鑫, 祝成瑶, 刘雪峰, 刘利民. 森林低温霜冻灾害干扰研究综述. 生态学报, 2013, 33(12): 3563-3574.
[7] 刘中新, 朱慧丽, 李建平, 张维. 麻城龟峰山古杜鹃花期滚动预报方法探讨. 气象科技, 2016, 44(1): 130-135.
[8] 罗佳. 陕西杨凌近 30 年来日本樱花花期的演变及其指示意义. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 165-170.
[9] Omoto Y, Aono Y. Estimation of change in blooming dates of cherry flower by urban warming. Journal of Agricultural Meteorology, 1990, 46(3): 123-129.
[10] 张冬峰, 高学杰, 罗勇, 夏军, Giorgi F. RegCM4. 0 对一个全球模式 20 世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献. 科学通报, 2015, 60(17): 1631-1642.
[11] Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, Alexander L V, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener F J, Dlugokencky E J, Easterling D R, Kaplan A, Soden B J, Thorne P W, Wild M, Zhai P M. Observations: atmosphere and surface//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 159-254.
[12] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970′s. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(3): 376-386.
[13] Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. Geophyssical Research Letters, 2002, 29(10): 78-1-78-4.
[14] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
[15] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
[16] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, Pan X H. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108
[17] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
[18] 张爱英, 王焕炯, 戴君虎, 丁德平. 物候模型在北京观赏植物开花期预测中的适用性. 应用气象学报, 2014, 25(4): 483-492.
[19] 张爱英, 张建华, 高迎新, 郭文利, 王焕炯. SW 物候模型在北京樱花始花期预测中的应用. 气象科技, 2015, 43(2): 309-313.
[20] Shi P J, Chen Z H, Yang Q P, Harris M K, Xiao M. Influence of air temperature on the first flowering date of *Prunus yedoensis* Matsum. Ecology and Evolution, 2014, 4(3): 292-299.
[21] 刘亚辰, 王焕炯, 戴君虎, 李同昇, 王红丽, 陶泽兴. 物候学方法在历史气候变化重建中的应用. 地理研究, 2014, 33(4): 603-613.
[22] Sparks T H, Jeffree E P, Jeffree C E. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 82-87.
[23] Bonhomme R. Bases and limits to using'degree.day′ units. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 1-10.
[24] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: Links to ocean temperature. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 53-59.
[25] Bradley N L, Leopold A C, Ross J, Huffaker W. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(17): 9701-9704.
[26] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. Nature, 1999, 397(6721): 659.
[27] 陈正洪, 肖玫, 陈璇. 樱花花期变化特征及其与冬季气温变化的关系. 生态学报, 2008, 28(11): 5209-5217.
[28] Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the timing of budburst in temperate trees. Journal of Applied Ecology, 1992, 29(3): 597-604.
[29] Hänninen H. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: An ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. Canadian Journal of Botany, 1995, 73(2): 183-199.
[30] Fu Y S H, Piao S L, Zhao H F, Jeong S J, Wang X H, Vitasse Y, Ciais P, Janssens I A. Unexpected role of winter precipitation in determining heat requirement for spring vegetation green-up at northern middle and high latitudes. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3743-3755.
[31] 孙朋杰, 陈正洪, 阳威, 向芬,叶冬. 武汉气象站周边环境对日照观测的影响. 太阳能学报:0254-0096(2017)02-0509-07